

2023年11月24日

【ドローンと電波】

ドローンで用いられる無線技術と カウンタードローンでの応用

澤田雅之技術士事務所(電気電子部門)所長
元警察大学校警察情報通信研究センター所長

澤田 雅之

【 目 次 】

I ドローンの仕組みと飛行させる方法

I-1 ドローンが飛行する仕組み

I-2 ドローンを飛行させる方法

II ドローンの操縦、映像伝送、テレメトリ伝送に用いられる無線技術

III 世界市場を席巻した中国DJI社製ドローン

～ 卓越した無線技術とフェイルセーフ機能 ～

IV ジャミング(電波妨害)によるカウンタードローン

IV-1 ドローンが他電波を受信した時の影響

IV-2 ジャミングを受けたドローンの挙動

V ドローンのジャミングに用いられる機器

I

ドローンの仕組みと飛行させる方法

I - 1

ドローンが飛行する仕組み

ドローンが飛行する仕組み

** 機体の向き・傾き・動き・周囲監視 **

地磁気・ジャイロ・加速度・イメージ等のセンサー

** 現在位置 **

操縦信号

フライト
コントローラ

GPS等の
衛星測位

** 目的地 **

各ローターの回転数を制御して飛行

GPS・各種センサーとフライトコントローラが ドローンの高度な飛行性能を実現

従来型の無線操縦へリ
と決定的に異なる点！



Airpeak S1 (出典：SonyのHP)
最大速度25m/s、最大風圧抵抗20m/s
最大飛行時間約30分、最大伝送距離2km

安定したホバリング

障害物探知回避機能

フェイルセーフ機能


安定したホバリング

【従来型の無線操縦ヘリのホバリング】

空中の一点に留まるには、風に流されないよう、無線操縦用スティックから指を離さず、操縦し続ける必要  さもなければ確実に墜落

 **運転支援機能の無い自動車と同じ！**

【ドローンのホバリング】

無線操縦用スティックから指を離れた途端に、フライトコントローラの働きにより、風に流されることなく空中の一点に留まり続ける。  ドローン
のフライトコントローラが自動的に操縦支援

 **運転支援機能付きの自動車と同じ！**

障害物探知回避機能

各種のセンサー情報をフライトコントローラが一元的に処理して、
高度な障害物探知回避機能を実現



Inspire 2 : 機体重量約3.5kg、最高速度94km/h (出典 : 中国DJI社のHP)

フェイルセーフ機能

飛行の継続に支障を来す不具合（操縦用電波の受信不能やバッテリーの消耗など）が生じた場合には、**フライトコントローラに設定されたフェイルセーフモードを自動的に実行**

障害物探知回避機能を  **有するドローンでは、**

発進地点に自動的に帰還するモードが一般的

他には、ホバリングして空中の一点に留まるモードや、徐々に下降して着陸するモードなど

テレメトリによる飛行状態の把握

テレメトリとは、ドローンの現在位置・飛行方向・飛行速度、バッテリーの残量、操縦用電波・GPS測位信号用電波の受信強度など、

ドローンの飛行状態に関する情報



「FPVによる無線操縦」や「GPSによる自律航行」に基づき、操縦者から直視できない遠方まで飛行できるドローンは、その飛行中、操縦者の無線操縦装置にテレメトリを無線伝送し続ける。

I - 2

ドローンを飛行させる方法

1 直視による無線操縦

従来型の無線操縦ヘリコプターや無線操縦飛行機と同様に、操縦者がドローンの飛行状況を直視し、無線操縦装置でドローンを遠隔操作して飛行させる方法



直視によりドローンを無線操縦するには、ドローンの機首の向きを操縦者が見分けられる必要

➡ 直視による無線操縦の限界距離は、数百m程度

2 FPVによる無線操縦

ドローンのFPV(First Person View)とは、ドローン搭載のビデオカメラが撮影したライブ映像のこと

➡ FPVによる無線操縦とは、ドローンから無線伝送されるライブ映像を操縦者が見ながら(ドローンに搭乗しているかのようなパイロットの視点で)、無線操縦装置でドローンを遠隔操作して飛行させる方法

これには、

ドローンと操縦者との間に電波を遮る建物等が無い見通し状態であって、ドローンからのライブ映像伝送用電波が操縦者まで届くことと、操縦者からの操縦用電波がドローンまで届くことが必要

➡ ISMバンド(2.4GHz)を使用した場合には、都心部では見通し状態であっても1kmも届かない。

しかし、

これからは、

携帯電話(4G、5G)をドローンの操縦・テレメトリ伝送・映像伝送に使用すれば、都心部の見通し外であっても、遠隔地からのFPVによる無線操縦が可能となる。

3 GPSによる自律航行

** GPSによるナビゲーション **

ドローンは、GPS衛星から送信される測位信号に基づき、現在の位置(緯度、経度、高度)を瞬時に判別
別 → ドローンのフライトコントローラが、設定された経路をたどって目的地までド
ローンを自動的に誘導 → GPSの測位誤差は10m程度。Galileo衛星(欧州)や
BeiDou衛星(中国)等からの測位信号の併用により、ドローンは測位誤差を1~2m程度に抑制



** “みちびき”が測位誤差を大幅に低減 **



準天頂衛星システム“みちびき”が本格運用開始(2018年11月)
→ “みちびき”が送信する「cm級測位補強信号」を使用すれば、GPS測位誤差はm単位からcm単位に激減

II

**ドローンの操縦、映像伝送、
テレメトリ伝送に用いられる無線技術**

ドローンは、“無線による操り人形”

従来型の無線操縦ヘリには、**フライトコントローラが無い**。 → 飛行方法は「**直視による無線操縦**」に限られ、操縦者の目の届かない遠方までの飛行は不可能

しかし、

ドローンには、**フライトコントローラが有る**。 → 飛行方法は、「**直視による無線操縦**」の他に、「**FPVによる無線操縦**」と「**GPSによる自律航行**」の2つの方法により、操縦者の目の届かない遠方までの飛行が可能

→ 目の届かない遠方を飛行できるドローンは、テレメトリ情報を操縦者の無線操縦装置に送信

つまり、

ドローンは、操縦用電波とGPS等の衛星測位用電波を受信しつつ、テレメトリ伝送用電波と映像伝送用電波を送信しつつ、飛行するのが一般的

→ いわば、ドローンは、“**無線による操り人形**”

ドローンの操縦・テレメトリ伝送・映像伝送に用いる電波

グローバルには、

2.4GHzのISMバンド(2,400~2,483.5MHz)と5.8GHzのISMバンド(5,725~5,850MHz)を主に使用

➡ ISMバンド(Industrial, Scientific and Medical Band)とは、高周波電磁エネルギーを無線通信以外の産業・科学・医療の目的に使用するために、国際電気通信連合によって取り決められた周波数帯であり、**Wi-FiやBluetoothも使用**

わが国では、

5.8GHzのISMバンド(5,725~5,850MHz)をドローンに用いることは不可であり、2.4GHzのISMバンド(2,400~2,483.5MHz)を主に使用 ➡ 最大出力は、**周波数ホッピング方式の場合には3mW/1MHz**、**OFDM方式の場合には10mW/1MHz**

加えて、+

無人移動体画像伝送システム専用バンド(2,483.5~2,494MHzと5,650~5,755MHz)が、ドローンの操縦・テレメトリ伝送・映像伝送に2016年の夏から使用可能 ➡ 最大出力は1Wであり、使用するには**無線局免許と無線従事者資格が必要**

ドローンの無線通信における問題点

*** 我が国で主に利用されるのは、2.4GHz帯のISMバンド ***

2つの大きな問題点



1 見通し外では通信が途絶

見通し外、つまり、ビルや山などに遮蔽されて操縦者からドローンを見通せなくなった途端に、無線操縦装置とドローンとの間の無線通信は途絶する。



無人移動体画像伝送システム専用バンドを用いてもこの問題は解決されない。

2 見通し内でも長距離の通信が困難

見通し内、つまり、操縦者からドローンを見通せる場合であっても、長距離の通信は困難であり、電気的な雑音が少ない田園地帯での通信可能距離は数km程度、電気的な雑音が多い都市部での通信可能距離は1kmに満たない。



無人移動体画像伝送システム専用バンドを用いれば、都市部での電気的な雑音の影響を受けなくなるが、それでも通信可能距離は5km程度である。

抜本的な解決策は、




携帯電話を、ドローンの無線通信に利用すること

携帯電話の上空利用の動向


**** ドローンでの携帯電話の活用を阻んだ要因 ****


1 携帯電話は「陸上移動局」

携帯電話は、無線局としての種別が、「陸上を移動中又はその特定しない地点に停止中運用する無線局」として規定される「陸上移動局」  携帯電話が「陸上移動局」のままでは、ドローンに搭載して上空で利用することは禁じられていた。

2 地上の携帯電話網を妨害する恐れ

携帯電話をドローンで利用した場合には、上空の携帯電話からの電波が広範囲に届く。

 近傍のエリアで運用中の携帯電話網(特に、同じ周波数を繰り返し使用している他の地上基地局)に妨害などの悪影響を及ぼす恐れがあった。

しかし、

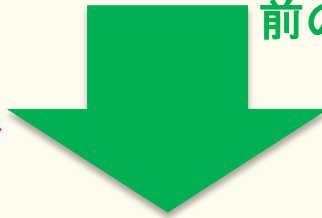
これからの“空の産業革命”で長距離物流などを担うドローンは、サービスエリアが広く、高速・大容量のデータ伝送が可能な携帯電話を利用することが欠かせない。

そこで、

次のページへ

前のページから

そこで、



【 2016年7月、携帯電話の上空利用に向けた「実用化試験局制度」が開始 】

他の地上基地局への干渉(妨害などの悪影響)を避けるために、ドローンの飛行エリアや飛行台数などを制限して監理する「試験計画」を作成し、総務省での審査を経た上で、「実用化試験局」の免許(有効期間は2年、免許人は携帯電話事業者)を受けた通信モジュールをドローンの無線通信(操縦、テレメトリ伝送、映像伝送)に用いることにより、携帯電話の上空利用に向けた試験的な運用が可能となった。

その結果、



「実用化試験局制度」により、離島や山間部などへのドローンによる長距離荷物輸送の試験運用が全国各地で実施されるようになった。



ドローン搭載用4G通信モジュール
(出典：NTTドコモのHP)

そして、



次のページへ

そして、 前のページから

【 2018年6月、携帯電話の上空利用に向けた「国際的な標準仕様」が策定 】

ドローン搭載の携帯電話からの電波が他の地上基地局へ干渉する問題を解決するため、3GPP (Third Generation Partnership Project : 携帯電話の国際的な標準仕様を策定するプロジェクト) が、ドローンに搭載した通信モジュールごとに送信電力を抑える仕組みを、標準仕様「3GPP Release 15」において規定

これを受けて、

【 2020年12月、「携帯電話の上空利用を拡大する制度」が整備 】

ドローン搭載の携帯電話からの電波が他の地上基地局等へ干渉しないよう、上空での送信電力制御や、上空で利用する周波数帯の限定などを条件として本制度が整備された。

これを受けて、

【 2021年7月、NTTドコモは、ドローン向け「LTE 上空利用プラン」の提供を開始 】

月額49,800円(税込)で月間データ容量120GBまでのLTE通信を、本プラン対応のSIMカードを装着したドローンで利用可能。同一の空域・時間でのLTE上空利用が集中しないよう、本プラン契約者専用の「LTE上空利用予約サイト」で利用日時、高度などを事前予約する。

Ⅲ

世界市場を席巻した中国DJI社製ドローン
卓越した無線技術とフェイルセーフ機能

中国DJI社製ドローンの機能と性能

*** DJI社製ドローンが有する2つの技術的な優位性 ***

- 1** 卓越したドローン無線技術
- 2** 他に類を見ない障害物探知回避機能



Matrice 300 RTK(出典：中国DJI社のHP)
最大飛行速度23m/s、最大風圧抵抗12m/s
最大飛行時間約55分、最大伝送距離8km
機体保護等級IP45

大量生産による低価格を実現し、抜きん出たコストパフォーマンスにより、我が国を含め世界の民生用ドローン市場を席卷

1

中国DJI社製ドローンの 卓越したドローン無線技術

ISMバンド(2,400~2,483.5MHz)における無線局免許や無線従事者資格を要しない低出力(10mW/MHz)

(注) ISMバンド(Industrial, Scientific and Medical Band)とは、高周波電磁エネルギーを無線通信以外の産業・科学・医療の目的に使用するために、国際電気通信連合によって決められた周波数帯であり、Wi-FiやBluetooth等にも利用されている。

抜群の性能



操縦・テレメトリ伝送・HDライブ映像伝送のいずれの信号も、**干渉が無い見通し状態であれば、120~130msの低遅延で、5~8km程の長距離伝送が可能**



都市部ではWi-Fi等と干渉するため、見通し状態であっても届く距離は1kmに満たなくなる。

2

中国DJI社製ドローンの 他に類を見ない障害物探知回避機能

ドローンの前後・左右・上下に、ステレオビデオカメラ・赤外線・超音波等のセンサーを備え、**フライトコントローラ**で一元的にデータ処理して各ローターの**回転数を調整**することにより、障害物探知回避機能を実現

具体的には、



【自動帰還中】

進行方向前方にある高木や建物等の障害物を数十m手前で探知して急停止し、障害物の高さを超えるまで上昇した後に自動帰還を再開する。

【自動着陸時】

着陸しようとする場所が着陸に適するか否かを、フライトコントローラがセンサーデータに基づき判断して、適する場合には自動的に着陸する。



適さない場合にはホバリング状態となり、操縦者の判断を待つ。

IV

ジャミング(電波妨害)による カウンタードローン

IV-1

ドローンが他電波を受信した時の影響

ドローンが他電波を受信した時の影響

ドローンの無線通信（操縦、テレメトリ伝送、映像伝送）
その主流はデジタル(OFDM)方式

一般論として、



ドローンと無線操縦装置との間で、信号や情報を送るために使用した無線チャネル、つまり、信号や情報を載せるために使用した搬送波と呼ばれる電波の周波数帯域に、同時に受信した他電波の周波数帯域が重なった場合には、他電波が電気的な雑音になる。

デジタル方式では、



無線受信部において、信号や情報を載せた搬送波の受信入力と、電気的な雑音となる他電波の受信入力との比率（信号対雑音比：S/N比）が低下（悪化）した場合に、デジタル方式ならではの「信号誤り訂正機能」の限界を超えて悪化しない限り信号や情報の受信品質は保持され、限界を超えて悪化すれば信号や情報は受信不能となる。

実際に生ずる影響は、



次のページへ

実際に生ずる影響は、



ドローンの無線通信に2.4GHz帯のISMバンド(2,400~2,483.5MHz)を用いる場合を想定すれば、同じ周波数帯域を使用しているWi-FiやBluetoothなどが、電気的な雑音となる他電波の送信源となる。

➡ それゆえ、人口密度が高くWi-FiやBluetoothなどの使用頻度が高い都市部では、田園地帯と比べて電気的な雑音となる他電波の受信入力は必然的に大きくなり、信号対雑音比の低下(悪化)を招く。

➡ その結果として、都市部では田園地帯と比べて、操縦者の無線操縦装置とドローンとの間で無線通信できる距離が著しく減少する。

このことから、



【ジャミングとは？】

ドローンに対して、無線操縦装置からドローンに送信される操縦用電波と同じ周波数帯域の電波(つまり、雑音となる妨害電波)を照射し、ドローンの無線受信部における信号対雑音比を「信号誤り訂正機能」の限界以上に低下(悪化)させることにより、ドローンが操縦信号を受信できなくすること。

IV-2

ジャミングを受けたドローンの挙動

ジャミング(電波妨害)を受けたドローンの挙動

*** ドローンはジャミングでは墜落しない! ***

【 ジャミングを受けた途端に、ドローンは急停止 】

ジャミングを受けて操縦信号が受信できなくなったドローンは、操縦用電波が途絶した時と同様に急停止して、風に流されることなく空中の一点に留まるホバリング状態となる。

➡ ドローンのフライトコントローラから見れば、ジャミングを受けた場合と操縦用電波が途絶した場合は、いずれも操縦信号が受信できなくなる点で同じである。

そして、

【 急停止して一定時間経過後に、フェイルセーフモードを起動 】

ドローンは、ジャミングを受けて急停止し、一定時間(数秒程度)が経過した後、フライトコントローラに予め設定された「フェイルセーフモード」を自動的に起動する。 ➡ フェイルセーフモードが「発進地点に自動的に帰還」であれば、ドローンは発進地点に向けて飛び去る。

➡ この場合、ドローンの取り逃がしも同然であり、ジャミングを受けなくなれば操縦信号の受信が復活して、ドローンが再び飛来する恐れがある。

ドローンを取り逃さないためには、

次のページへ

前のページから

ドローンを取り逃さないためには、



【 操縦用電波に加えてGPS等の衛星測位用電波をジャミング 】

衛星測位用電波(GPS等のGNSS Band)のジャミングにより衛星測位ができなくなった途端に、ドローンは現在位置を見失ってしまうため、発進地点の方角もわからなくなり、**発進地点に向けて飛び去ることができなくなる。**

➡ ドローンのフライトコントローラは、バッテリー残量が発進地点までの帰還に要するレベル以上か否かの計算ができなくなるため、**バッテリー残量減に対するフェイルセーフモードを起動し、ドローンをその場に着陸させる。**

つまり、



ジャミングでドローンを墜落させることはできない。 ➡ しかし、操縦用電波と衛星測位用電波に対するジャミングで、ドローンを急停止させ、そのままフェイルセーフモードを起動させることにより、ドローンをその場に着陸させることができる。

V

ドローンのジャミングに用いられる機器
日本国内で使用する場合には無線局免許の取得が必要

ジャミングガン

操縦用電波(2.4GHz帯や5.8GHz帯等のISM Band)と衛星測位用電波(GPS等のGNSS Band)を同時にジャミングできる、銃のような形状の機器

➡ 尖った円錐状に広がる妨害電波を発射できるので、照準をきっちりと合わせるまでもなく、ドローンの大体の方角に向けて発射すればよい。このため、頭上を高速で通過していったドローンであっても、追撃するように発射すれば非常に有効である。



DroneGun Tactical(出典: オーストラリアDroneShield社のHP)
各ISM Bandと各GNSS Bandに有効、最大射程約1km
重量約7.3kg、2時間以上の運用可能、IP54



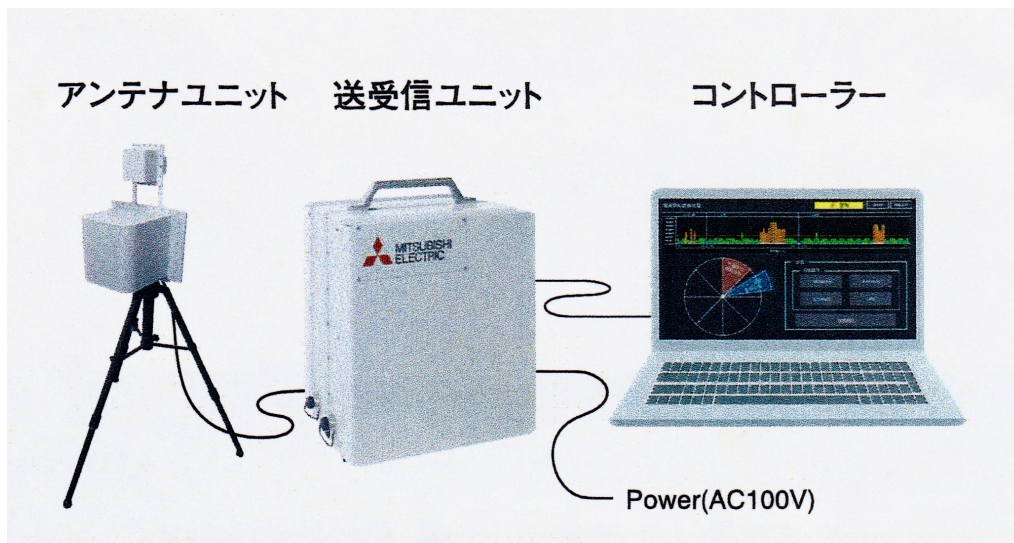
DroneGun Mk3(出典: オーストラリアDroneShield社のHP)
各ISM Bandと各GNSS Bandに有効、最大射程約0.5km
重量約2.1kg、最長2時間の運用可能、IP55

三菱電機の電波探知妨害装置

**** 固定設置して運用する長射程のジャミング砲 ****

【 装置の構成と機能 】

- 指向性を持つ送受信共用のアンテナユニット、受信電波の信号処理及び妨害電波を生成する送受信ユニット、ドローンの探知情報を表示して妨害電波の発射操作を行うコントローラーで構成。
- ドローンが無線操縦装置に向けて送信するテレメトリ伝送用電波や映像伝送用電波を受信し、信号処理によってドローンを判別・探知する。ジャミングは、ドローンの操縦用電波として我が国で利用可能な複数の周波数帯と、GPS衛星測位用周波数帯に対して、妨害電波を同時に発射できる。



(出典：三菱電機のカタログ)

【 装置の性能概要 】

- 探知妨害エリアは、水平方向45度及び垂直方向45度の空間
- 最長約3km遠方のドローンが発するテレメトリ伝送用電波等を探知可能
- 最長約3km遠方のドローンに対して、操縦用電波と衛星測位用電波を妨害可能

イスラエルRAFAEL社のDrone Dome

* グローバルに活用されているカウンタードローンシステム *

【ドローンの飛来探知・確認・対処を1式で行えるDrone Dome】

Drone Domeは、飛来したドローンの探知・確認・対処を迅速・的確に行えるよう、探知用レーダー（写真左から2番目の装置）、探知用広帯域受信装置（写真左から3番目の装置）、確認用カメラ（写真内最も右にある装置）、対処用ジャミング装置（写真内最も左にある装置）を、システム化している。



Drone Dome






(出典：イスラエルRAFAEL Advanced Defense Systems社のHP)

Drone Domeの機能と性能



次のページへ

【 Drone Domeの機能と性能 】

- 探知用レーダーは、3次元フェーズドアレイレーダー(Sバンドで最大出力350W)を4個使用して全天をカバー  対角径が10cm程の小型ドローンが飛来した場合であっても、その方角・距離・高度をm単位の誤差で、数kmの彼方で探知可能
- 探知用広帯域受信装置は、3次元フェーズドアレイアンテナを用いて、仮想的な鋭い指向性アンテナで対象空間を高速スキャン  20MHz～6GHzの帯域内において、ドローンで一般的に使用される電波(ISM Band等)や、予め探知対象として登録した電波が発射されているか否かを自動的に調べ続けて、発射を探知した場合にはその方角とドローンである可能性を瞬時に判別
- 確認用カメラは、CCDカメラとサーマルカメラを併用  探知用レーダーや探知用広帯域受信装置が捉えた方角にカメラを振り向けて、最大約3km先の映像の中から「動く物体」を検出し、ドローンか否かを判断し、ドローンであれば映像で追尾  一連の動作が自動で可能
- 対処用ジャミング装置は、3次元フェーズドアレイアンテナ(トータルの出力は最大400W)を用いて、20MHz～6GHzの帯域内において、対象周波数帯域を鋭い指向性のビームでジャミング  ドローンで一般的に使用される電波や衛星測位用電波(GPS等のGNSS Band)へのジャミングの他、ソフトウェア無線の技術を用いて、予め検知対象として登録した電波に対応したジャミングができる。

イスラエルRAFAEL社のDrone Dome

***** 代表的な活用事例 *****



【 2018年英国ガトウィック国際空港ドローン侵入事案 】

2018年の12月19日夜から12月20日夜にかけて、ロンドンのガトウィック国際空港に複数のドローンが侵入を反復したため、空港は閉鎖され十数万人に影響した。そこで、**英国陸軍がIS対策用として同年に調達して6式を保有していたDrone Domeの1式を空港に投入した結果、ドローンの侵入が止み、12月21日朝に空港は再開された。**

【 2021年英国コーンウォールG7サミットでのカウンタードローン 】

2021年6月に英国のコーンウォールで開催されたG7サミットでは、ドローンによるテロ攻撃を防ぐため、**英国陸軍が2018年から保有するDrone Domeが用いられた。**

2023年11月24日

【ドローンと電波】

ドローンで用いられる無線技術と
カウンタードローンでの応用

終

澤田雅之技術士事務所(電気電子部門)所長
元警察大学校警察情報通信研究センター所長

澤田 雅之